



TITLE:

## 研究室紹介

AUTHOR(S):

---

CITATION:

研究室紹介. Cue 2010, 23: 16-37

ISSUE DATE:

2010-03

URL:

<https://doi.org/10.14989/108665>

RIGHT:

## 新設研究室紹介

### 複合システム論講座（土居研究室）

<http://turbine.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「生体・生命システム工学 ～電気工学と生物の因縁から医工学の革新へ～」

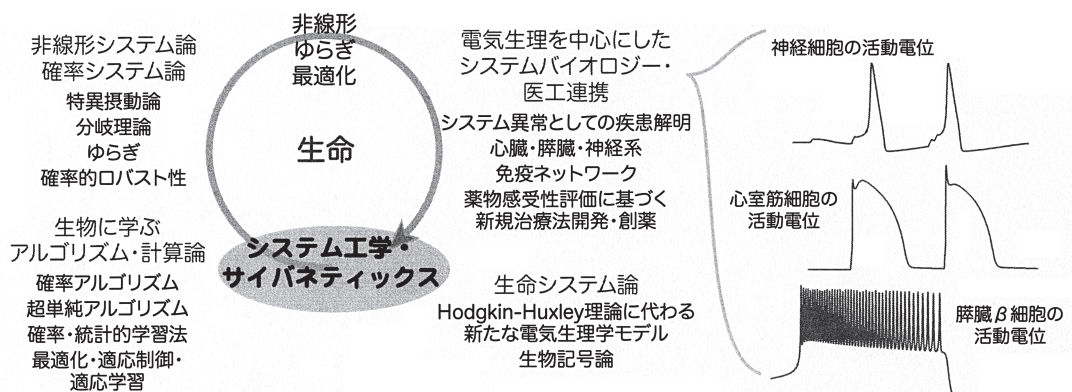
電気工学・計算機科学と理論生物学・生体システム工学との「因縁」は深くて古い。サイバネティクスを提唱した電気工学者ウィーナーの名前を持ち出すまでもなく（さらに、CUE20号の矢島先生による記事「デジタルとゆとり」に紹介されている、フォン・ノイマンの自己増殖オートマトンもそのような因縁の代表例である）、例えば、私が学生時代を過ごした本学理学部理論生物物理学講座の教員は4人のうち2人が京大電気出身であった。その後所属した阪大基礎工学部生物工学科にも、やはり京大電気出身の教員が2人いた。このような因縁の深さは、もちろん、電気工学の方法、いや、そもそも工学の方法論が、生命を理解する上で極めて有効であり、生命を理解することが（システム）工学の発展につながることに関係しているのであるが、ここで、それらについて語る紙面の余裕はない。

これまで、非線形・ゆらぎ・最適化をキーワードに、広くシステム工学に関する研究を行ってきた。以下の図は、これまでの研究とこれから目指す方向性を説明する概念図である。生命を中心としながら、一見生命から掛け離れたものまで、生命とシステム工学との因縁の深さを示している。これまでの研究の中で、最も精力を注いできたものが「電気生理学」の理論研究である。細胞の膜には、イオンチャネルという特定のイオンを通すタンパク質の孔が開いている（動的に開閉する）。ここをイオンが通ることによって、細胞膜内外の電位差が変化し、細胞は活動電位と呼ばれる100mV程度の電気信号を発生させる。図の右側に示したように、この活動電位は脳・神経系のみならず、心臓や膵臓ランゲルハンス島のインスリン分泌細胞など、生命の維持に重要な役割を果たしており、活動電位の異常が様々な疾患を導く。活動電位は、イオンチャネルを非線形抵抗と見なした等価回路モデルで表現できる。モデルを用いた理論研究により、活動電位の異常の原因解明や治療法開発への貢献が期待できる。特に、イオンチャネルの遺伝的・後天的異常により発現した疾病（イオンチャネル病）は、神経系疾患・心臓病・糖尿病など広範囲にわたり、イオンチャネルをターゲットとした治療薬開発など、現代社会が抱える医療の問題へのインパクトは大きい。これら「計算論的電気生理学」に関する詳しい内容は、2010年春出版予定の拙著 [1] を読んでほしい。

以上、2009年4月に着任した土居の研究を中心に紹介したが、最後に一言。ウィーナーがサイバネティクスを提唱した原動力は「細分化した専門分野の枠を超えた（医学と工学の）交流」であった。「学際的研究こそが革新を生む」ことは、当時から半世紀以上を経た今日でも真理であると信じて止まない。また、「役に立つこと」「社会的有用性」の説明を強要される応用指向の時代、敢えて応用を叫ばない辛抱強さが大学人には求められているように思う。このような観点での教育・研究を推進したい。

### 参考文献

- [1] S. Doi, J. Inoue, Z. Pan and K. Tsumoto, *Computational Electrophysiology: Dynamical Systems and Bifurcations*, Springer (2010) in press.



## 集積システム工学講座 情報回路方式分野（佐藤高史研究室）

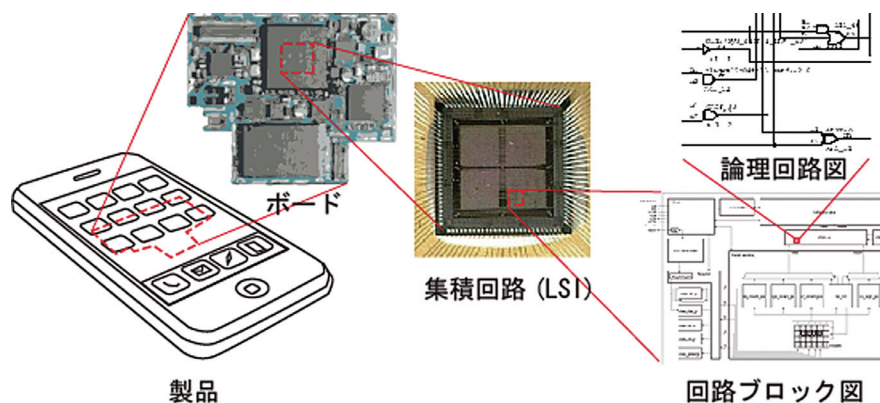
<http://www-lab09.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

### 「集積回路の構成と設計技術」

私たちの周囲にはパソコン、携帯電話、デジタルカメラ、デジタルテレビ、ビデオ録画・再生機器、電子辞書、ゲーム機など、様々な情報機器があり、私たちの生活に欠かせないものとなりつつあります。高速な通信や、画像、音声などを扱う高度なメディア処理を実現するために、これらの情報機器の中で共通して用いられている中核部品は集積回路（LSI）です。LSIは2センチ角ほどの小さな部品ですが、その中には数億個ものトランジスタと配線がきわめて密度高く配置され、高度な情報処理が実現できるように接続されています。このような大規模で複雑なLSIが、高性能で低消費電力となるにはどのような構成をとればよいか、誤りなく動作するものとなるべく短期間に設計するにはどうしたらよいか、が非常に重要な技術となっています。さらに、自動車、ロボットや医療用途など、LSIの応用が広がるにつれて、高い信頼性も同時に達成する必要があります。

我々の研究室では、高性能、低消費電力、かつ高信頼性を実現する集積回路の構成技術、設計技術と、そのシステム応用についてデバイスレベルからシステムレベルまで一貫して考えることにより、高い付加価値の実現、すなわち、より便利、快適、安心な情報機器の実現を目指しています。

- (1) 超高集積・超可用性を保証する回路設計技術：自動車、ロボットや医療用途等では、高性能と高信頼性の両立が強く要求されます。数十億もの素子を相互接続して実現する回路を、効率良くしかも特性を保証しながら設計するには、物理が支配する素子レベルのミクロな視点から、システム全体を俯瞰するマクロな視点までを的確に抽象化して回路を最適化する技術が必要となります。本研究室では、素子物理を正確に、または大規模回路を適切にモデル化し解析するための数理的手法、回路構成手法、および設計手法について、ハードウェアとソフトウェアの両面から研究しています。
- (2) リコンフィギャラブルシステム：リコンフィギャラブルシステムとは、機能の「書き換え」が可能な回路を用いたシステムです。汎用プロセッサ並みの柔軟性と、専用ハードウェアエンジンに匹敵する高速性の両立を狙って、本研究室では、回路動作中に自分で自分の機能を書き換えることが出来る動的自己再構成アーキテクチャをはじめ、様々なリコンフィギャラブルデバイスのアーキテクチャ（演算器の機能やその粒度、配線資源、再構成方式等）と、そのための設計手法を含む応用技術について研究している。宇宙等でのリコンフィギャラブルデバイスの利用に不可欠な高信頼化に関する研究も行っています。
- (3) 画像認識技術：集積回路を用いる典型的な応用システムとして、画像認識技術があります。画像認識は、車載、ロボティクス、セキュリティ等の組込み分野において広い応用がありますが、一般に膨大な演算量を必要とするので、消費電力が制限される組込み用途では、動作周波数を低く抑えたまま高い演算性能を実現するための並列処理技術が重要となります。本研究室では物体検出と追跡などを対象とし、並列性が高くかつ認識性能の高いアルゴリズムの研究を行い、そのシステム構成手法や専用プロセッサの開発を行っています。



## 研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

(\*は「新設研究室紹介」、☆は「大学の研究・動向」、#は「高校生のページ」にも掲載)

### 電気関係研究室一覧

工学研究科

電気工学専攻

複合システム論講座(土居研) \*

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野

電磁工学講座超伝導工学分野(雨宮研)

電気エネルギー工学講座生体機能工学分野(小林研)

電気エネルギー工学講座電力変換制御工学分野(引原研)

電気システム論講座電気回路網学分野(和田研)

電気システム論講座自動制御工学分野(萩原研)

電気システム論講座電力システム分野(大澤研)

電子工学専攻

集積機能工学講座(鈴木研)

電子物理工学講座極微真空電子工学分野

電子物理工学講座プラズマ物性工学分野

電子物性工学講座半導体物性工学分野(木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野(松重研)

量子機能工学講座光材料物性工学分野(川上研)

量子機能工学講座光量子電子工学分野(野田研)

量子機能工学講座量子電磁工学分野(北野研)

光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野(高岡研)

デバイス創生部門先端電子材料分野(藤田研)

情報学研究科(大学院)

知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野(黒橋研)

知能メディア講座画像メディア分野(松山研) ☆

通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野(吉田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野(守倉研)

通信システム工学講座知的通信網分野(高橋研)

集積システム工学講座情報回路方式分野(佐藤高研) \*

集積システム工学講座大規模集積回路分野(小野寺研)

集積システム工学講座超高速信号処理分野(佐藤研)

システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野(石井研)

システム情報論講座医用工学分野(松田研)

エネルギー科学研究科(大学院)

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野

エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野

エネルギー応用科学専攻

応用熱科学講座エネルギー応用基礎学分野(野澤研) #

応用熱科学講座プロセスエネルギー学分野(白井研)

エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野(長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野(水内研)

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野(佐野研)

生存圏研究所

中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野(山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野(津田研)

生存圏開発創成研究系宇宙圏電波科学分野(山川研)

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野(大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野(橋本研)

京都大学ベンチャービジネスラボラトリー(KU-VBL)

産官学連携センター

研究戦略分野 §

注 § 工学研究科電子工学専攻橘研と一体運営

高等教育研究開発推進センター

情報メディア教育開発部門(小山田研)

学術情報メディアセンター

ネットワーク研究部門ネットワーク情報システム研究分野(中村研)



## 電気エネルギー工学講座 生体機能工学分野 (小林研究室)

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~lab03/>

## 「脳磁図・MRI 計測を目指した超高感度光ポンピング原子磁気センサの開発」

現在、脳の様々な働きが解明されつつあるが、なお多くの謎が残されている。特に、意識や精神、創造性といった、人間を特徴づける高次機能に関しては、謎ばかりといっても良い。高次脳機能の解明は、科学の進展に寄与する事はもとより、認知症や統合失調症といった精神疾患の診断・治療をはじめ医療や福祉にとっても極めて大きな意義がある。ヒトの脳神経活動を非侵襲的に調べる手法 [1] の中で、大脳皮質のニューロンから発生する極微弱な磁場を計測する脳磁図 (MEG) は、その時空間分解能の高さから大変重要な役割を果たしている。現在、この MEG 計測には磁気センサとして  $1 \text{ fT/Hz}^{1/2}$  オーダの感度を有する SQUID (超伝導量子干渉素子) が広く使用されてきている。SQUID を用いることで、脳から生じる磁場のマッピングや、生体内の基礎的な電気的活動に関する知見を得ることが可能となっている。しかし、SQUID は超伝導量子干渉効果を用いるため、液体ヘリウムにより極低温状態にして動作させる必要があり、装置や維持費が高くなるという問題があることは否めない。

一方、近年光ポンピング法により生成したアルカリ金属原子のスピン偏極を用いて磁場を測定する光ポンピング原子磁気センサ (optically-pumped atomic magnetometer) に注目が集まっている。光ポンピングされたアルカリ金属原子はスピン偏極し、そこに印加される磁場が直線偏光の偏光面を回転させるため、この回転角により磁場を検出できる。近年、スピン偏極の緩和レートが小さくなる状態 (SERF: spin-exchange relaxation-free) を利用すれば、センサの感度が  $\text{subfT}/\sqrt{\text{Hz}}$  オーダまで到達可能であるという報告がなされ、SERF 状態で動作する超高感度光ポンピング原子磁気センサに期待が寄せられている。このセンサは測定体積が小さくても十分な感度を保つことが期待でき、多チャンネル化により高い空間分解能を持った磁場計測が可能になると予想される。また、このセンサは原理的に SQUID を凌ぐ測定感度 ( $\sim 0.01 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ ) を有し、冷却装置を必要とせず、MEG のみならず MRI 装置のセンサとして小型化や低コスト化を可能にし、当該分野にイノベーションをもたらすと期待される。当研究室では、2006 年度から科学技術振興調整費「先端融合領域イノベーション拠点の形成」プログラムとしてキヤノンと京大の協同で実施している「高次生体イメージング先端テクノハブ」において、このセンサによる MEG と超低磁場 MRI 装置の開発を進めている。図 2 は、開発中のセンサ実験系 (図 1) により初めて計測されたラットの心磁図 [2] である。

## 参考文献

- 1) Tetsuo Kobayashi, et al (eds.), "Brain Topography and Multimodal Imaging", (Kyoto Univ. Press, Kyoto 2009)
- 2) S. Taue, et al., "Measurement of biomagnetic fields in small animals by use of an optical pumping atomic magnetometer", Biomagnetism: Interdisciplinary Research and Exploration, (eds.) Kakigi, R. et al. (Hokkaido Univ. Press), pp.9-11. (2008)

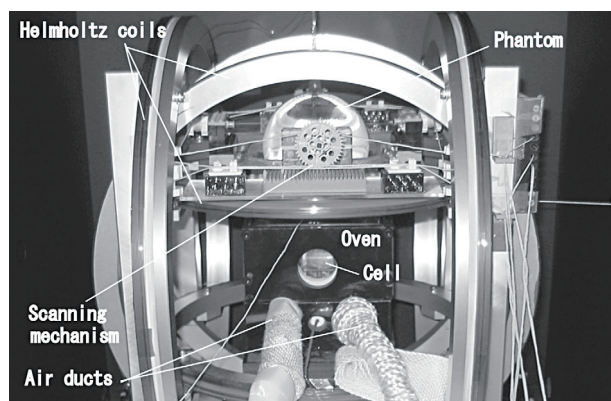


図 1. 光ポンピング原子磁気センサ実験系による生体ファントムからの極微弱磁場分布計測の様子

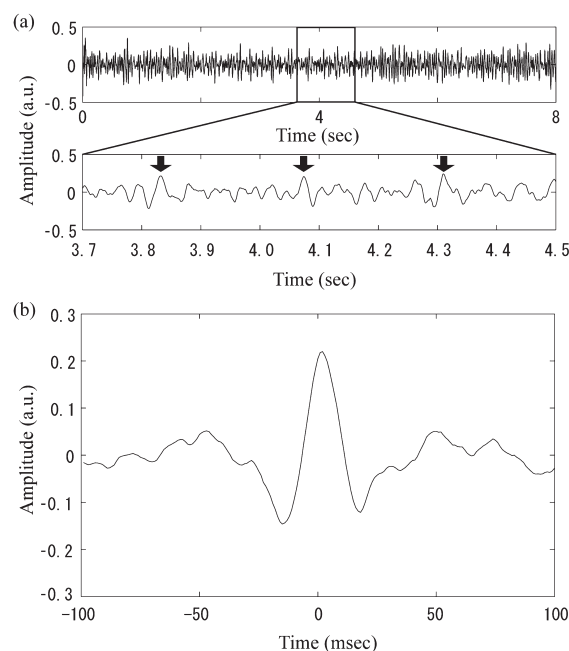


図 2. ラットの心磁図計測結果の一例。(a) 原波形 (矢印が R 波)、(b) 加算平均波形

## 電気システム論講座 電気回路網学分野 (和田研究室)

<http://bell.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「デジタル集積回路の EMC 設計：線形マクロモデル LECCS」

今日、携帯電話や無線 LAN・パソコン・デジタル家電など、デジタル機器と通信が融合した環境が当然になっている。デジタル機器には多くの集積回路 (IC: Integrated Circuit) が使用される。今日の大規模集積回路 (LSI) は数 100 万トランジスタを含み、また 1 ナノ秒 ( $10^{-9}$ s) 以下のスイッチング速度で高速動作している。これを周囲の機器や回路に干渉を起こすことなく正常に動作させるためには、回路基板の高周波設計や電磁雑音低減設計、すなわち EMC 設計 (Electromagnetic Compatibility Design) が必須である。しかし、個々の回路素子を表現する回路モデルで IC/LSI を表現したのでは、複雑かつ大規模すぎてとても対応できない。そのため、IC/LSI の高周波特性を考慮した簡略モデル、すなわち高周波マクロモデルの開発が進められている [1]。

本来、デジタル回路の動作は、電圧が閾値レベルより高いか低いかで出力を切り替えるスイッチングが基本である。たとえばデジタル回路の基本であるインバータは図 1 に示すように 2 個のトランジスタが入力電圧に従いオン・オフする。そのときのトランジスタの抵抗値や容量値は時間とともに変化する時変で非線形な特性を持つ。しかし、そのマクロな特性が線形モデルにより表現可能であることが経験的に知られており、当研究室ではこの線形マクロモデル LECCS を高周波まで拡張するとともに、その適用可能範囲を明確にするための研究を進めている。最近、線形マクロモデル化できる条件が明らかになってきた。また、その精度向上のためには、図 2 図 3 に示すようなチップ内の回路ブロック間とチップ・パッケージ間の寄生結合を含むモデル化が重要であることを示した [2]。このモデルは日本では LECCS、ヨーロッパでは ICEM と呼ばれ、これを統合したものとしての国際標準化が進んでいる [3]。近い将来、実際の回路設計への適用が進むものと期待される。

【参考文献】 [1] S.B.Dhia, M. Ramdani, E. Sicard (Editors), Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits, Chap. 5, Springer, 2006. [2] 斉藤ほか, “多電源ピン LSI のブロック間結合を考慮した 3 ポート LECCS-core モデル”, 信学論 (B), Vol.J93-B, No.02, Feb. 2010 (掲載予定). [3] IEC 62433-2 (2008-10) Ed. 1.0, EMC IC modelling - Part 2: Models of integrated circuits for EMI behavioural simulation - Conducted emissions modelling (ICEM-CE).

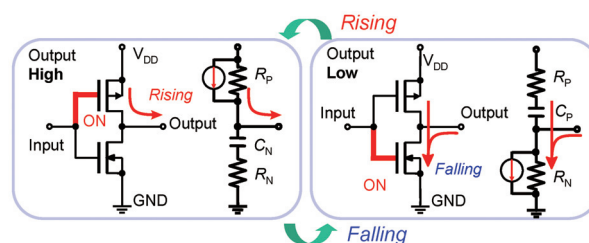


図 1 デジタル回路インバータの線形モデル

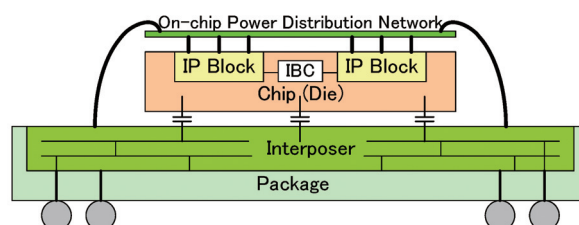


図 2 集積回路チップとパッケージのモデル

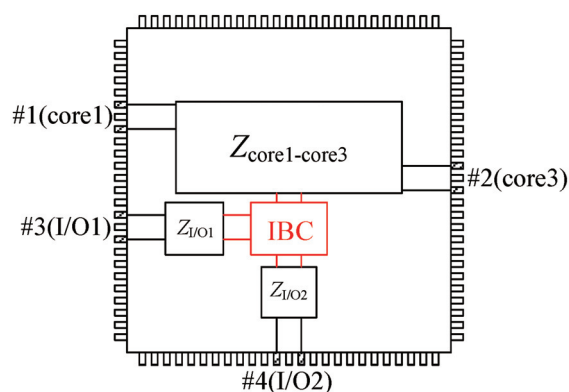


図 3 ブロック間結合 (IBC) のモデル化 [2]

## 電気システム論講座 自動制御工学分野（萩原研究室）

<http://www-lab22.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「非因果的周期時変スケーリングに基づくサンプル値制御系の解析と設計」

## 1. モデルに基づく制御と、モデル化誤差に対するロバスト制御

本研究室では、さまざまな実システムの制御における性能向上を可能とするための制御理論に関する研究を展開している。制御理論とは、一言でいえば、制御対象の動的な入出力関係をなんらかの形で表現した数学的モデル化に基づき、制御対象からできるだけ高い性能を引き出すようなフィードバック制御器を合理的手段で設計するための方法を与える数学的理論ということができる。設計手段を与える「解」は数学的に解析的な形で表されるとは限らないが、コンピュータの能力を活用すれば実用的には十分に解けるような形での（場合によっては近似的な）「解」を与えることが、研究の基本的目標といえる。

このようなスタンスは、産業界でも数多く利用されているPID制御器において、熟練者の経験と試行錯誤に基づくパラメータ調整を通して性能向上を図るといった方法とは対極にあり、引き出しうる性能を最大限引き出している保証を与え得る点で意義が大きい。しかし、熟練者によるパラメータ調整では、必然的に存在するはずのモデル化誤差への配慮も暗黙のうちになされるのに対して、コンピュータを活用しての設計では、モデルが完璧なものであるという理想化した仮定に立つことになる結果、非現実的な設計に至る可能性も懸念される。そのような事態を避けるため、モデルが持ちうる不確かさをあらかじめ見積もった上で、その不確かさの範囲では所望の性能が達成されることを厳密に保証するという考え方、すなわち、モデル化誤差に対してロバスト性を有する制御器の設計（ロバスト制御器設計）を可能とするような手段を提供することも含めて制御理論の役割といえる。

## 2. スケーリングに基づくロバスト性の取り扱いと非因果的周期時変スケーリングによる性能向上

制御対象のモデル化誤差を $\Delta$ と表し、フィードバック制御系の $\Delta$ 以外の部分（制御対象の理想モデルと、それをもとに設計された制御器からなる部分）を $G$ と表すことにすれば、現実の制御系は図1のように表現することができる。以下、話を単純化するため、制御系に対する要求としては安定性のみを考えることにする。直感的に言って、信号が図1の系におけるループを巡回するにつれて発散していくことが制御系の不安定性を意味しており、逆に言えば、 $G$ と $\Delta$ の（適切な形で定義される）ゲインの積が1未満であれば、制御系は安定である。したがって、不確かさ $\Delta$ に関して、そのゲインが適当な値 $\alpha$ 以下であると見積もられているならば、 $G$ のゲインを $1/\alpha$ 未満とするように（ $G$ に含まれている）制御器を（すでに確立されている手法により）設計すればよいことになる。このような考え方は、 $\Delta$ に関する事前情報がゲイン $\alpha$ 以外に一切存在しないと仮定すれば、数学的にはロバスト性に関する必要十分条件を扱ったこととなっており、特段の不都合はない。しかし、実際には、不確かさ $\Delta$ は、制御対象の複数の局所的な不確かさに帰着されることがしばしばであるなど、利用しうるより詳細な事前情報が一般にはある。そのようなケースでは、十分条件に基づく考え方に陥っていることになり、 $G$ のゲインを $1/\alpha$ 未満とするだけでは、本当に最大の性能を引き出しているかどうか定かでないことになってしまう。

この難点を避ける考え方がスケーリングであり、もっとも単純化した説明としては、「適当な $W$ 」を用いて、図1における $G, \Delta$ をそれぞれ $G_W := WG W^{-1}$ ,  $\Delta_W := W \Delta W^{-1}$ に置き換えた系を考えるというものである。信号の流れに関しては $W$ はキャンセルされるため、現実のロバスト性には影響を与えないが、数学的な取り扱いとしては、 $W$ を自由に選べる分だけ、より必要十分条件に近いものとなる。このような $W$ として、（ $G$ や $\Delta$ の複数の入力信号間での）空間的スケーリングを行う方法が従来より知られているが、本研究室では、これに代って時間軸方向に、しかも「非因果的」かつ「周期時変」な形でスケーリングを行うことが、とくにデジタル制御器を持つサンプル値制御系の解析と設計に対して極めて有効であることを見だし、この考え方を活用した研究を展開している。

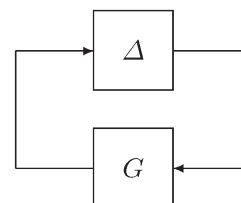


図1: 不確かさを持つ制御系



## 電気システム論講座 電力システム分野（大澤研究室）

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~ohsawa/index.html>

## 「風力発電システムへの短期／長期ハイブリッドエネルギー貯蔵の適用」

地球温暖化防止対策の一つとして太陽光発電、風力発電などの自然エネルギー発電の導入が推進されています。自然エネルギー発電のなかでも風力発電は発電コストが安価なために実用化の段階にありますが、大容量の風力発電機が多数系統連系されると、出力の変動性のために電力系統の周波数や電圧の変動などが問題となる可能性があります。これらの問題に対する抜本的な対策は、エネルギー貯蔵装置の導入です。また、マイクログリッド（分散型電源やエネルギー貯蔵装置などからなる局地的電力供給システム）の自立運転モードのように、電力システムから独立して地域的に運転される場合にも、エネルギー貯蔵は必須です。この研究では、電力需給の短期的過渡不平衡に対しては比較的小容量で応答の速い電気二重層キャパシタ（UC）で、長期的定常不平衡に対しては水素ガスをエネルギー貯蔵媒体とした、比較的容量が大きく応答が遅い燃料電池／水電気分解（FC/ELZ）で対応するという、ハイブリッドエネルギー貯蔵方式を対象とし、風力発電に適用したシステムについて検討を行っています（図1）。

風力発電システムとしては、二次励磁誘導発電機を用いた可変速風力発電を仮定して、このシステムを数学的にモデル化し、制御方式を提案し、その動的な応答をシミュレーションによって検討しています。図2に動的応答の例を示します。風力発電出力  $P_{ig}$ 、負荷電力  $P_{load}$  のステップ状変化（それぞれ10秒、5秒および15秒）に対するUCの電力  $P_{uc}$ （充電の場合を正）、FCの出力  $P_{fc}$ 、ELZの消費電力  $P_{elz}$  を示しています。UCが変動の過渡的な部分を補償しているのに対して、FC/ELZは電力需給不平衡の定常的な部分を補償するように制御されています。このように、定常的な不平衡はFC/ELZで吸収することによって、UCの電力は定常的にはゼロになるように制御することが可能になります。つまり、電気二重層キャパシタUC／燃料電池FC／水電気分解ELZのシステムは、風力発電を負の負荷とみなすと、供給が過剰なときはELZで消費して水素を製造し、供給が不足するときは水素を使用してFCで供給する電力供給システムと考えることができます。

本研究の主なポイントは、非線形性の強いシステムの運転・制御方式をどのように確立していくかです。上で示した例では風力発電のみを考えていますが、各種の発電方式が含まれるシステムについて、それぞれの制御方式を検討する必要があります。また、各種の構成要素の容量など、最適な構成方法を確立することも今後の課題です。

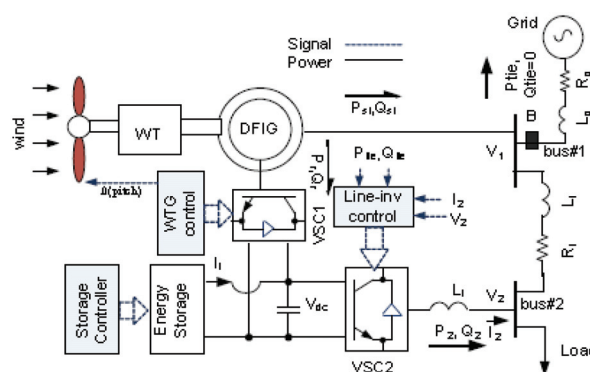


図1. 提案システムの構成

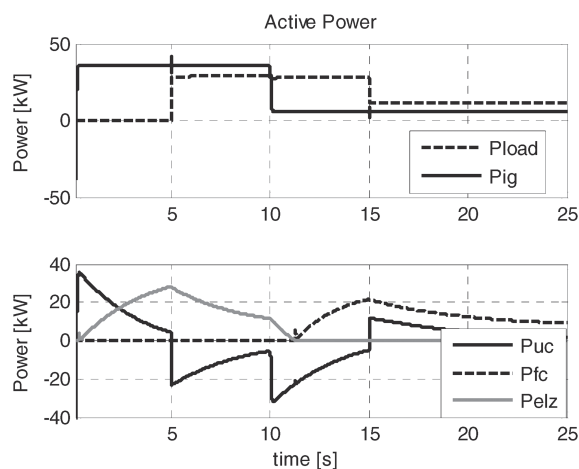


図2. 風力発電出力と負荷の変化に対する応答例



## 電子物理工学講座 プラズマ物性工学分野

<http://plasma1.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「炭素循環系構築へ向けた液中溶解二酸化炭素のプラズマ還元処理」

燃焼機関等の産業活動で人為的に放出される二酸化炭素は、地球温暖化の主要因と言われており、最近では世界の大勢もわが国の政府もその削減策の立案に取り組んでいることは周知の事実です。鉄鋼業などの高付加価値産業の発展を妨げないためには、二酸化炭素のある一定量の排出は避けようがなく、その処理策の提案がこれまでに様々な形態でなされてきました。現在最も有力とされる方法の1つは、高濃度排気ガスからの隔離後の地中岩盤への貯蔵と考えられておりますが、二酸化炭素の再資源化による炭素循環系を構築できればよりよい解決策となり、いわゆる低炭素化社会にさらに一步近づくことができます。この二酸化炭素の排出削減法として、当研究室の研究テーマである“プラズマ”を用いて行う解決策として、我々は以下のような提案を行っております。

- (1) 工場からの排出ガス中の高濃度二酸化炭素を水（電解液、海水等）に溶解させる（高い溶解度を利用）。
- (2) 自然光エネルギーにより電気分解で水素を発生させる。
- (3) 発生した水素を水中のプラズマ生成電極で保持し、大気圧プラズマを生成して溶解二酸化炭素を還元する。
- (4) 生じた生成物（一酸化炭素、メタン等）及び反応に用いられなかった剰余分の水素を再資源化する。

このうち、図1に示しますように、我々はすでに水中の水素泡を電極上に整列させ、その中に大気圧水素プラズマを生成することに成功しております（本誌 cue No. 19 の研究室紹介をご参照ください）。このとき、水素泡は、外部から水素ガスを供給することなく、電解液の電気分解により生成しております。

そして、最近、同様にして生成した液中の水素プラズマにより、液中に溶解している二酸化炭素の還元処理に成功しました〔参考文献〕。図2に、液中水素プラズマの発光スペクトルを示します。このスペクトルには、水素原子のスペクトルの他に二酸化炭素のスペクトルが多く観測され、溶解していた二酸化炭素が水素泡内に輸送されていることがわかります。さらに、スペクトルには、一酸化炭素由来のラインが数多く検出されており、一酸化炭素が生成されていることがうかがえます。この結果を再確認するため、上方置換法により収集した気体をガスクロマトグラフにより分析したところ、図3に示すように、一酸化炭素が確かに検出されました。この一酸化炭素の生成の機構としては、プラズマ中で解離した水素原子ラジカルによる二酸化炭素の還元反応の他に、プラズマ中電子による二酸化炭素の付着解離現象も寄与しているものと考えられます。

今後は、自然光エネルギーによる電気分解過程についても新たな提案を行い、前述の炭素循環システムの構築につなげていきたいと考えています。

## 〔参考文献〕

O. Sakai, T. Morita, N. Sano, T. Shirafuji, T. Nozaki and K. Tachibana, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42**, 202004 (2009) .

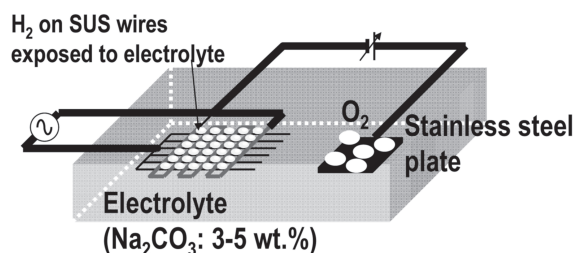


図1. ファブリック電極を電気分解電極として併用した液中気泡中のプラズマ発生方法。

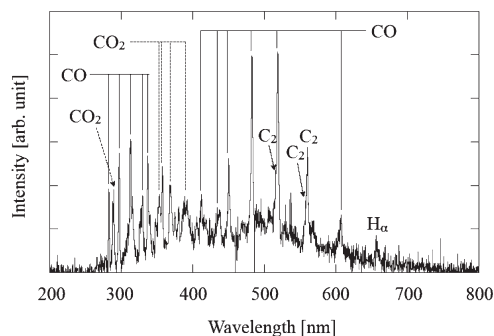


図2. 液中水素プラズマの発光スペクトル。

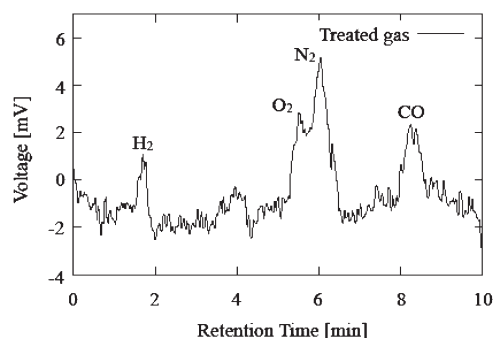


図3. 処理気体のガスクロマトグラム。

## 電子物性工学講座 電子材料物性工学分野（松重研究室）

[http:// piezo.kuee.kyoto-u.ac.jp/](http://piezo.kuee.kyoto-u.ac.jp/)

## 「カーボンナノチューブ電界効果トランジスタのチャネル電位可視化」

単層カーボンナノチューブ（SWNT）は理想的な1次元特性を有し、バリスティック伝導や単一電子トンネリングなどの特異な物性を示すことから、基礎・応用の両面から注目されている新機能材料です。特に、SWNTをゲートチャネルに用いるカーボンナノチューブ電界効果トランジスタ（CN-FET）は次世代のナノ電子デバイスとして期待されています。CN-FETの特性は金属電極とSWNTとの界面電子状態によって支配されるため、接合界面およびSWNTチャネルにおける電子状態を解析することは本質的に重要な課題となっています。本研究室では、原子間力顕微鏡（AFM）の一種であるケルビンプローブ原子間力顕微鏡（KFM）という表面電位計測法を用いて、動作状態にあるCN-FETのチャネル部の電子状態を評価しています。ここでは、動作状態にあるCN-FETチャネルの電位を、周波数検出方式のKFM（FM-KFM）により可視化した実験結果について紹介します。

一般にCN-FETは図1(a)のような構造を持っています。Si基板をバックゲート電極として用い、基板上のSiO<sub>2</sub>絶縁膜の上にソースおよびドレインとなる2つの金属電極を作製します。SWNTはこれらの電極を接続するFETチャネルとして動作します。図1(b)は、Ti電極間にSWNTを誘電泳動法（電気泳動の一種）により架橋して作製したCN-FETの一例（AFM像）です。A-Bに沿ってのAFM形状プロファイルから示されるチャネル部の高さは約4 nmであり（図1(c)）、このチャネルが複数のSWNTから構成されるバンドルであることが分かります。また、ゲート電圧依存特性の測定から、このCN-FETは両極性特性をもつことが分かりました。図2は、FM-KFMによる可視化された、このCN-FET試料の表面電位像です。ドレイン電圧を一定に保ち、ゲート電圧 $V_g$ を変化させて、表面電位観察を行っています。その結果から、ドレイン電極端で、ゲート電圧に依存する顕著な電位変化が生じることが分かりました。

SWNTの仕事関数の典型値は4.8 eVであり、Tiの仕事関数4.3 eVより大きいため、p型領域でキャリアとなるホールに対して、Schottky障壁を形成すると考えられます。KFMにより測定された、チャネルに沿った表面電位は、チャネル上のバンドの傾き／曲がりを反映することから、得られた電位プロファイルからSWNTのバンド構造を推察することが可能です。ドレイン端に表れた大きな表面電位は、SWNTの電子状態がゲート電圧に依存して大きく変化することを示しています。実際、このCN-FETのドレイン電流－ゲート電圧特性は、ゲート電圧が-2 Vから+2 Vの間で空乏領域特性を示し、ドレイン電流は大きく変化します。これらの結果は、ドレイン端に存在するSchottky障壁における障壁厚さが、ゲート電圧に依存して変化することを意味しています。つまり、ドレイン電極端からSWNTに注入されるホールのトンネル注入確率がゲート電圧により変調されることで、ドレイン電流変化が引き起こされたと考えられ、いわゆる「Schottky障壁変調モデル」を支持する結果が得られたことになります。

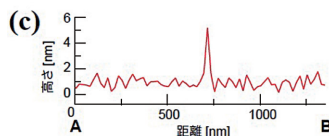
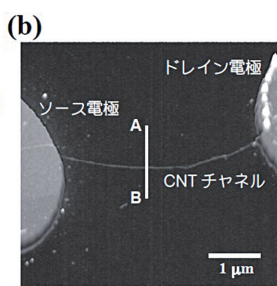
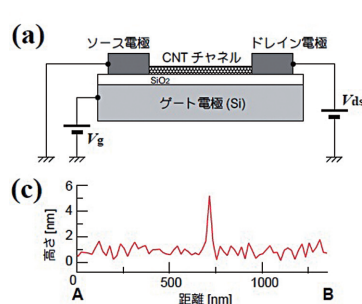


図1. (a) CN-FETの構造。電子に対してソース電極を定義 (b) 誘電泳動法で作製されたCN-FETのAFM像。 (c) (b) 図中のA-B間の断面プロファイル。CNTの高さ（直径）が4nmあることが分かる。

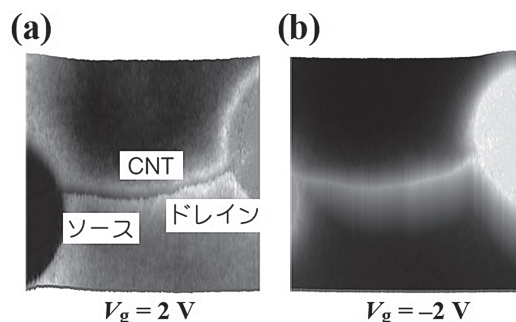


図2. FM-KFMにより測定されたCN-FETの表面電位像。ドレイン電圧を1V、ゲート電圧を(a) 2V, (b) -2Vとしたときの結果。ソース電極の電位は常に0V。

## 量子機能工学講座 光量子電子工学分野（野田研究室）

<http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「フォトニクス：3次元フォトニック結晶の「表面」における光子の操作」

3次元フォトニック結晶は、光の波長と同程度の周期的屈折率分布をもち、いわゆるフォトニックバンドギャップを有することを特徴とする。これは、丁度、周期的な静電ポテンシャル分布をもつ半導体等の固体結晶中を運動する電子に対してエネルギーバンドギャップが形成されることと類似している。このような3次元フォトニック結晶は、光子を制御・操作するための基本要素として注目を集め、様々な光回路の実現の鍵を与えるものと期待されている。これまで、3次元フォトニック結晶を用いた光制御を行うには、結晶の「内部」に人工欠陥や発光体を埋め込み、3次元的な全ての方向のバンドギャップ効果を利用することが不可欠と考えられてきた。しかしながら今回、我々は、周期性が終端される3次元フォトニック結晶の「表面」においても、光子を制御・操作することが可能であることを示すことに成功した。この成果は、全く新たな光子の操作法の実現に繋がるものである。

まず、エバネッセント結合法により、3次元フォトニック結晶の「表面」のフォトニックバンド構造をマッピングし、確かに「表面」に光が安定して存在し、これらの表面状態を介して光子が伝搬可能であることを見出した。さらに、表面構造を工夫することで、これらの表面モードにギャップを形成し、その上で人工的な表面欠陥構造を導入することによって、表面の任意の位置に光子を局在させることに成功した（図1）。驚くことに、このような表面欠陥モードは、これまで報告されている全ての3次元フォトニック結晶ナノ共振器を凌駕する世界最高のQ値を示した（Q値は約9,000以上に達する）。

今回の我々の研究結果は、フォトニック結晶による新しい光子操作方法を与えるのみならず、金属表面におけるプラズモンポラリトン効果やその他の表面光現象とも関連するものであり、物理的にも大変興味深いものと言える。さらに、通常の金属表面とは異なり、3次元フォトニック結晶表面は吸収がないため、新しいセンシング応用や、高効率な光-物質の相互作用を実現する場を与えるものとしても大いに期待される。

## 参考文献

[1] K Ishizaki & S Noda, Nature, vol.460, pp.367-370 (2009) .

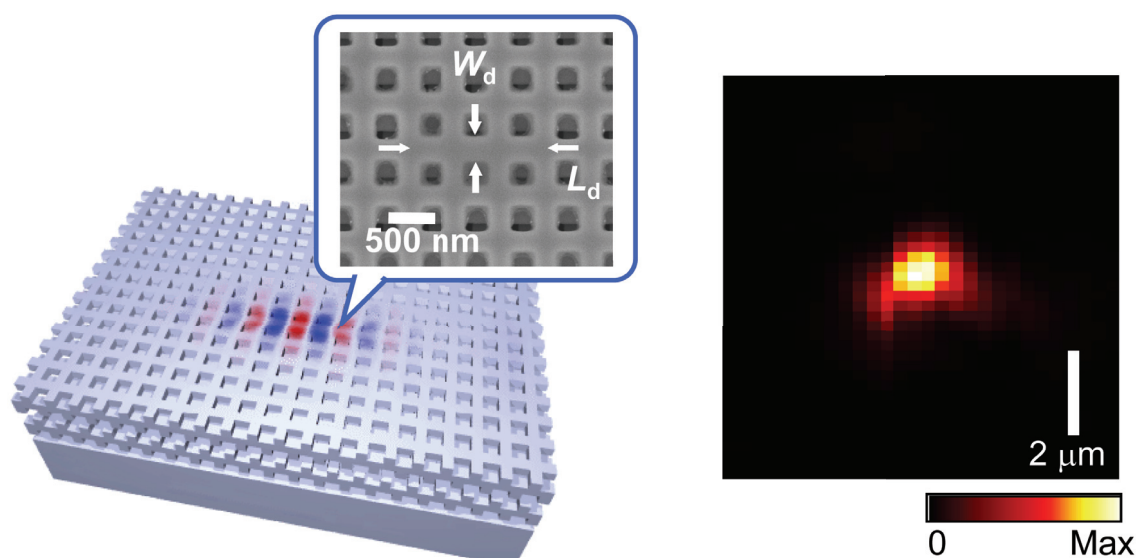


図1. 3次元フォトニック結晶の表面における光局在現象。



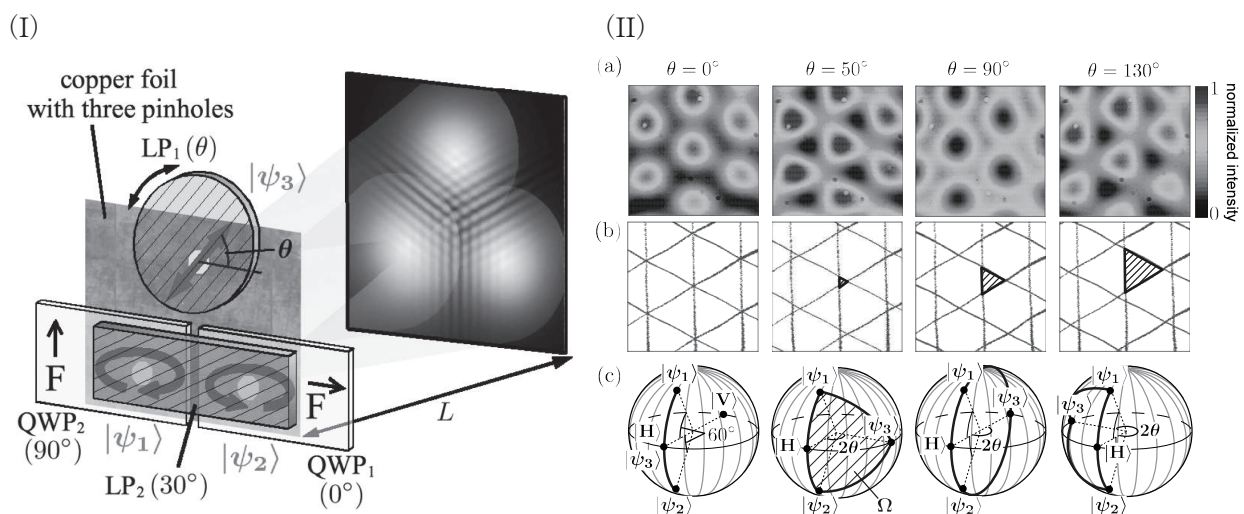
## 量子機能工学講座 量子電磁工学分野（北野研究室）

<http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「3 光束干渉計における幾何学的位相の直接観測」

量子状態を表現する状態ベクトル（状態ケット）の位相の取り方には自由度があるが、この自由度には幾何学性質が内在している。この性質に由来する位相変化は幾何学的位相もしくは Berry 位相と呼ばれ、基礎から応用までさまざまな分野で研究されている。これまでは、量子系が段階的（あるいは連続的）に変化したときに発生する幾何学的位相を対象とした研究がほとんどであった。しかし、幾何学的位相は量子状態の状態空間内の幾何学的な位置関係のみで定義されるものであり、量子系の時間発展は必ずしも必要としない。このような考えにもとづき、我々の研究室では、時間発展を必要とせずに幾何学的位相を観測する方法を考案した。研究では、量子系として最も単純な 2 状態系である光の偏光状態を利用し、3 状態（3 偏光）で定義される幾何学的位相を対象とした。

下図 (I) に示すような、3つのピンホールを透過した光（3 光束）の干渉を考える。図上の  $|\psi_1\rangle$ ,  $|\psi_2\rangle$ ,  $|\psi_3\rangle$  がそれぞれの光の偏光状態を表している。実験では、 $|\psi_1\rangle$ ,  $|\psi_2\rangle$  は横長の楕円偏光で固定されており、 $|\psi_3\rangle$  は、直線偏光でその偏光方向を偏光子  $LP_1$  の角度  $\theta$  を変えることで制御することができる。ヤングの干渉実験（2 光束の干渉実験）では、2つの穴に垂直な方向に干渉縞が形成されるが、3 光束の干渉では、3 光束の2つが組となり1つの干渉縞を形成するために、3 方向の干渉縞の重ね合わせが投影される。この干渉パターンは偏光 ( $|\psi_1\rangle$ ,  $|\psi_2\rangle$ ,  $|\psi_3\rangle$ ) に依存し、例えば偏光板  $LP_1$  の角度  $\theta$  を変化させた場合には下図 (II) (a) のように変化する。この干渉信号より、3 方向の干渉縞を画像処理によって抽出すると下図 (II) (b) のようになる。偏光などの 2 状態系の任意の状態はポアンカレ球と呼ばれる球上の 1 点として表現することが可能で、それぞれの  $\theta$  に対して下図 (II) (c) のように表現される。幾何学的位相  $\Delta_3$  はこのポアンカレ球上の 3 状態 ( $|\psi_1\rangle$ ,  $|\psi_2\rangle$ ,  $|\psi_3\rangle$ ) のなす球面三角形の面積として現れるが、下図 (II) (b) に網かけした三角形の面積  $S$  がこの幾何学的位相  $\Delta_3$  と関係している ( $S \propto \Delta_3^2$ )。干渉縞に形成される三角形の面積  $S$  は、3つのピンホールの直後にガラス板などを挿入し、それぞれ独立な光路差を導入しても変化することはない。このことは、幾何学的位相がそれぞれの偏光状態の位相の取り方に依存しないゲージ不変な量であることを表している。



[1] H. Kobayashi, et al., to be published in Phys. Rev. A (arXiv:0906.0212)

[2] S. Tamate, et al., New. J. Phys. 11, 093025 (2009)



## 知能メディア講座 画像メディア分野（松山研究室）

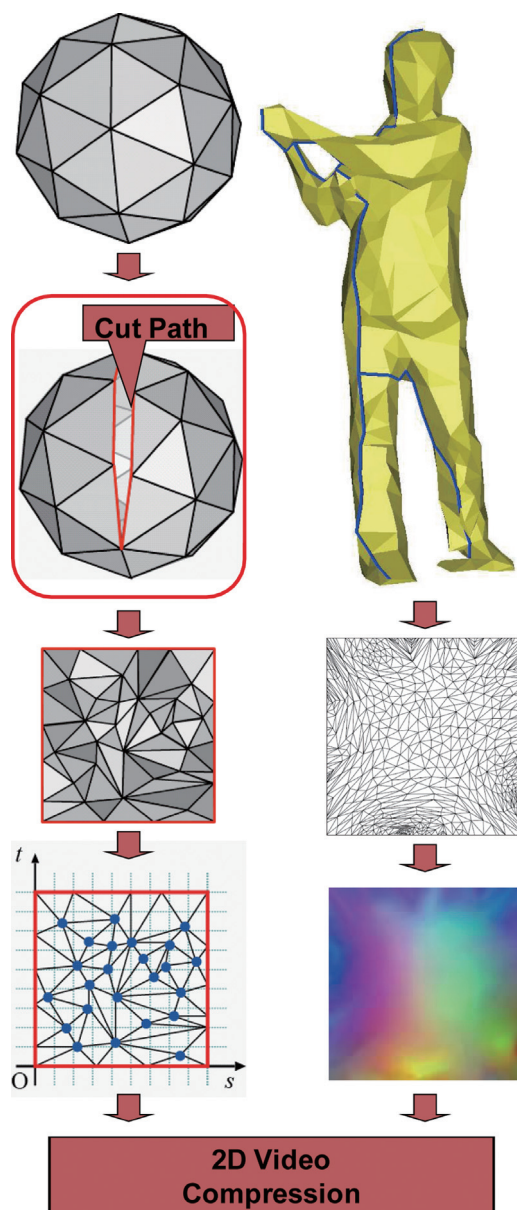
<http://vision.kuee.kyoto-u.ac.jp/japanese/index.html>

### 「3次元ビデオの圧縮符号化」

3次元ビデオとは、対象を取り囲むように配置した多数のビデオカメラで撮影した実写多視点映像から（裏側を含めた）完全な3次元立体映像を生成する技術であり、これまでに舞妓の踊りのような無形文化財のデジタルアーカイブ化などを実現してきた。3次元ビデオは通常の2次元映像と比較して膨大なデータ量となるため、非圧縮のままでは保存・伝送に多大なコストがかかる。たとえば、非圧縮のハイビジョン映像が約470Mbps、これをMPEG2で圧縮した地上デジタル放送のハイビジョン映像が約15Mbpsであるのに対して、非圧縮の3次元ビデオは約3000Mbpsと桁違いに大きい。本研究ではこれを圧縮符号化するアルゴリズムの開発を目指している。

3次元ビデオを構成するデータは主に3次元表面形状を表す幾何学的な情報と、表面色などを表す光学的な情報の2種類に分類され、そのうち特にデータ量が大きく圧縮法が確立されていないのは形状情報である。一般に3次元形状情報は多面体（3角形ポリゴンモデル）で表される。我々が提案するSkin-offアルゴリズムではこれを以下の手順で2次元画像に変換することでデータ圧縮を実現する。（1）多面体（図1段目）に切れ目（カットパス）を入れる（図2段目）。（2）切り開かれた多面体を平面矩形へと引き延ばして展開する（図3段目）。このときカットパスは矩形の縁となり、矩形内は元の多面体を構成していた3角形が変形されたもので埋められる。（3）矩形内を適当な密度で格子状にサンプリングし、各サンプリング点に対応する元の多面体表面上の点の3次元座標値（ $x,y,z$ ）を計算する（図4段目）。（4）サンプリングで得られた各点の（ $x,y,z$ ）の値を画像の3原色（R,G,B）に読み替えると、通常の2次元画像と同様に（R,G,B）値が格子状に並んでいると見なせるため、これを既存の画像／映像圧縮法（JPEGやMPEG）で圧縮する。

ここで問題となるのは、①「3次元表面形状を2次元の平面に展開する」という操作は、球体の地球が様々な図法で平面地図へと変換できるように一意でないこと、②元の3次元形状がドーナツのように穴（ハンドル）を持つ場合、平面に展開するには切れ目をハンドルの数だけ追加する必要があるということの2点である。Skin-offではこれらの問題点を考慮しながらカットパス選択を最適化することで圧縮率向上を図っている。また得られた平面映像の圧縮は、既存の符号化ハードウェアやネットワーク配信技術との親和性が高いという利点がある。今後はこの特長を生かしてインターネットを通じた3次元ビデオの配信などへの応用を目指す予定である。



左：Skin-offの概念図。多面体（1段目）に切れ目（カットパス、2段目）を入れて平面へと展開する（3段目）。元の多面体を持っていた（ $x,y,z$ ）座標値を画像の3原色（R,G,B）に読み替えると、画像／映像として圧縮保存できる。右：実際の例。

## 通信システム工学講座 知的通信網分野（高橋研究室）

<http://cube.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

## 「TCP/IP ネットワークにおけるフローサイズを考慮した優先制御方式の提案」

近年、通信ネットワークの広帯域化及びインターネット関連技術の発展によって、ネットワーク上で利用されるサービスは量・種類共に増加しています。2000年頃からはP2P（Peer-to-Peer）型のファイル共有アプリケーションが登場し、それによって生じる膨大なトラフィックが問題視されるようになってきました。P2Pアプリケーションでは一般的にマルチメディアファイルの共有が行われ、Webアプリケーションのトラフィックに比べてフローサイズが圧倒的に大きいという特徴があります。そのため、P2Pアプリケーションによって発生するサイズの大きいフロー（以下、エレファントフロー）が、Webアプリケーションにおいて発生するサイズの小さいフロー（以下、マウスフロー）の帯域を圧迫し、Webアプリケーションにおいて遅延の増大やスループットの低下が発生して通信品質が劣化するという問題がでてきました。

P2P ネットワークでは個々のクライアントノードが完全に自律的に振る舞うため、P2P トラフィックの識別が容易ではありません。利用ポート番号を用いた識別方式やシグネチャ方式による識別などが提案されてはいますが、いずれも P2P トラフィックを完全・容易に識別できる方法とは言えず、そのため、ISP における P2P トラフィックの規制が困難となっているのが現状です。それに対して、P2P アプリケーションのトラフィックをあらかじめ識別しなくてもフローサイズを考慮することにより、マウスフローの品質を改善できる方式として LAS（Least Attained Service）が考案されました。LAS ではルータに到着している各フローの転送データ量を保持しておき、転送データ量が少ないフローから優先的に転送します。これによって、エレファントフローの存在下でも、マウスフローは他のフローと同じ転送データ量になるまで優先して転送され、帯域の圧迫を防ぐことができるようになりました。しかしながら、LAS では全てのフロー情報を記憶する必要があるため、ルータの負荷が増加してしまうという問題がありました。

この問題を解決するため、本研究では、各フローの転送データ量を参照するパケットをサンプリングし、ルータ負荷を削減した SLAS（Sampling LAS）を提案し、さらに、フロー情報の集約に基づきルータ負荷を削減する SLAS with FA（SLAS with Flow Aggregation）の二つの方式を提案しました。前者では、フローテーブルの更新を行うパケットをサンプリングによって削減することで、ルータにおける負荷を削減しています。また、後者では全てのフローにおいて共通のタイマを持つ、一定時間間隔ごとに各フローにおけるパケットの到着状況を調べ、その間に到着がなかったフローは送信完了とみなしてエントリから削除します。これにより、フローテーブルの記憶領域を大幅に削減することができ、パケットの到着ごとに必要だったタイマのセットも必要なくなりました（図1参照）。さらに、本研究では、平均スループットやルータ負荷をシミュレーションによって比較評価し、提案方式の有効性を確認しました（図2参照）。

## 参考文献

横田健治, 朝香卓也, 高橋達郎, " ネットワークの品質を改善するエレファントフロー制御方式, " 電子情報通信学会論文誌, Vol.J92-B No.4, pp. 760-769, 2009.

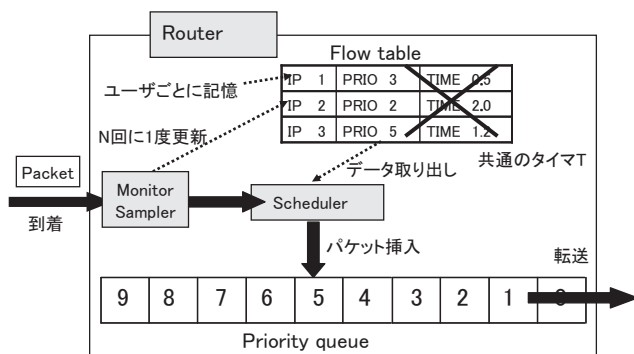


図1. SLAS with FA のアルゴリズム

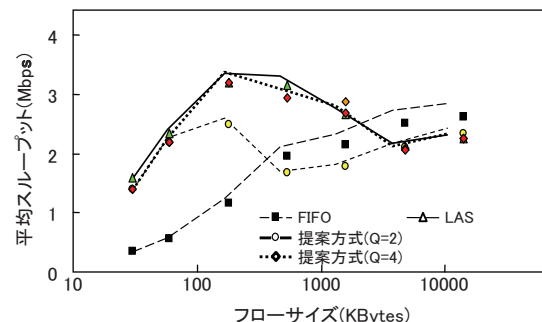


図2. フローサイズごとの平均スループット

## 集積システム工学講座 超高速信号処理分野（佐藤亨研究室）

<http://www-lab26.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

## 「ファイバ非線形効果の誤り率への影響の高速評価法」

インターネットの普及に伴う加入者系伝送路の光化の進展により、長距離光伝送システムの大容量化がさらに望まれています。このようなシステムとして有望視されているのが、図1に示すようなファイバによる光パワー損失を光増幅器で補償する光多中継システムです。光ファイバは低損失ですが、数十kmも伝送すると、さすがに光パワーが弱まってしまうので、光信号を光のまま増幅して、さらに伝送します。この光増幅器間を1スパンと呼びます。1本の光ファイバで1種類の信号だけを伝送するのはもったいないので、通常は周波数の異なる光それぞれに異なる種類の信号を載せ、図1のようにそれらすべてを1本の光ファイバで伝送します（各々を“チャンネル”と呼びます）。

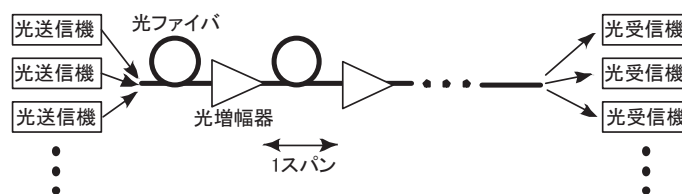


図1：長距離光ファイバ伝送系の概要

しかし、光ファイバの直径は数十 $\mu\text{m}$ と非常に細く、光増幅器により光ファイバ内の光パワー密度が増大するため、非線形効果が起こり、波形劣化が生じてしまいます。多くの光増幅器を用いると、さらに非線形効果の影響が大きくなってしまいます。デジタル信号は、誤って受信される確率である“誤り率”で評価を行います。波形劣化が生じると誤り率の劣化につながります。伝送速度を増大させることは光パワーの増加を伴いますので、非線形効果の影響は今後益々増加することになります。

以上のようなシステムを設計する場合、伝送路である光ファイバの種類を変え、ファイバ非線形効果が起こりにくい組合せをシミュレーションにより求めます。1チャンネルだけの伝送であればよいのですが、複数チャンネルのシステムでは信号の組合せを変えてシミュレーションを行う必要があり、伝送路の長さにより数時間～数日もかかります。

そこで、複数チャンネルの場合の非線形効果の影響が雑音を増加させたように見なせることと、その大きさが1チャンネルの光パワーに依存することを見出しました[1]。そこで、これらを利用して、計算機内で適切な雑音を発生させ、その影響を計算することで、従来よりも高速に誤り率への影響を評価できることを示しました[1]。

図2に結果の一例を示します。縦軸は誤り率に対応する $Q$ 値で示しており、大きいほど誤り率が良くなります。横軸はスパン数で、1スパン80kmで示しています。35スパン程度まで提案法が有効であることが分かります。これより長い伝送では別の非線形効果が効いてきますので、十分な長さと考えられます。また、計算に要する時間は、シミュレーションにかかる時間の1/400となります。これにより、伝送路の設計において容易に最適な構成とすることが可能となります。

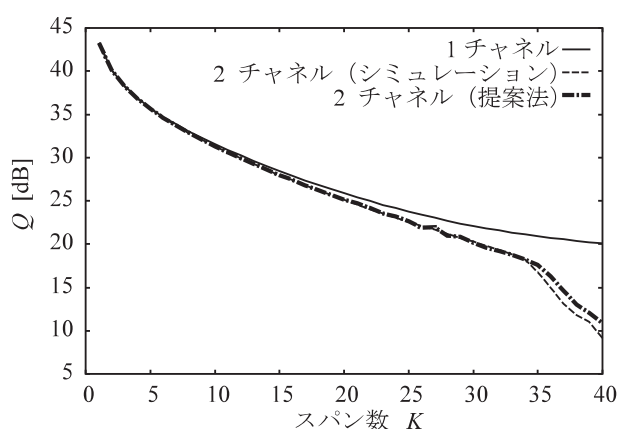


図2：スパン数に対する $Q$ 値

参考文献 [1] 乗松, 岡田, 小田, 信学論 Vol.J91-B, No.2, pp.140-150, 2008.



## システム情報論講座 論理生命学分野 (石井研究室)

<http://hawaii.sys.i.kyoto-u.ac.jp/home>

## 「遮蔽に強いベイズ超解像」

当研究室では、不確実な環境に対して学習によって適合するシステムとしての「生命」と「知性」の計算原理を明らかにすることを目的に、多岐にわたる研究を行っています。また、学習するアルゴリズム（機械学習）の研究、学習する「人工的知性」を持つ知能ロボットの研究なども行っています。

表題の超解像は、複数の観測画像の情報を統合することで、観測画像より高解像度の画像を得る情報処理手法をいいます。この手法は、動物の視覚情報処理機構、および機械学習の研究から生まれたもので、例えば顕微鏡画像や衛星画像の高解像度化に貢献することが期待されます。

我々は、ベイズ統計を用いた超解像法の開発を行っており、これをベイズ超解像と呼んでいます。確立された方法論である統計学に立脚することで、推定の良さについて保証された手法を用いることができます。ベイズ統計を用いない統計学においては、最尤推定がある種の最適性を持ちますが、この最適性は観測される標本数（超解像の場合、観測画像枚数）が無限大に近づくときにのみ成り立ちます。現実にはせいぜい数十枚の観測しか得られないため、観測のみから真の高解像度画像を推定した場合、同程度に尤もらしい高解像度画像が無数に存在することになります。最尤推定ではそれらから最も尤もらしい候補を選びますが、ノイズに強く影響されて不安定になるため、しばしば、正解である真の高解像度画像とかけ離れたものが得られてしまいます。そこで真の高解像度画像に関する知識を用い、かつその知識の不確実性をも考慮して、無数の可能性から適切に絞り込むのがベイズ統計です。真の高解像度画像は未知ですが、その統計的性質は全くの未知ではありません。例えば、隣接する画素間は近い値をとりやすいなどの強い相関をもっています。こうした知識を組み込むことで推定精度を向上させることができます。また、観測過程を工夫することで遮蔽物が混入した観測画像から適切に遮蔽物を除去し、背景画像の超解像を行うことができます。以下に遮蔽物除去を行う超解像の一例を紹介します。図1は背景の本棚の前を横切る女性を断続的に撮影した9枚の観測画像を表示したもの、図2,3はそれぞれベイズ推定により推定された遮蔽パターンと縦横各々4倍の画素数に増大した高解像度画像です。ベイズ超解像では、遮蔽物の混入の有無に関する推定の曖昧性を考慮して画像復元を行います。我々は、このように画像の知識と推定の不確実性を考慮する数学的手法を開発することで、超解像の限界に挑んでいます。

## 参考文献

- "Superresolution with Compound Markov Random Fields via the Variational EM Algorithm", A. Kanemura, S. Maeda, and S. Ishii. *Neural Networks*, 22 (7), 1025-1034, (2009)
- "ベイズ超解像と階層モデリング", 兼村厚範, 福田航, 前田新一, 石井信. *日本神経回路学会誌*, 15 (3), 181-192, (2008)



図1 観測画像

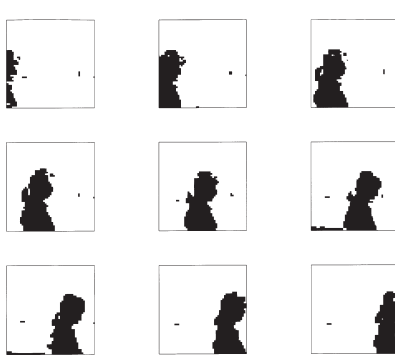


図2 推定された遮蔽パターン



図3 ベイズ超解像で推定された高解像度画像



## エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/kondok/index-j.html>

### 「ヘリカル系プラズマにおける三次元 MHD 平衡とプラズマ電流分布の時間発展」

太陽のエネルギー源である核融合エネルギーを地上で利用する人工太陽炉を実現するには、燃料を制御熱核融合反応に必要な一億度以上に加熱する必要がある、このような状況では物質はプラズマ状態になっています。したがって、人工太陽炉実現には、このような超高温プラズマを閉じ込める必要があります。プラズマは荷電粒子の集合体なので、これを閉じ込める手段として磁場を用いた方法が検討されています。そのための方法として、主に外部コイルに流す電流だけで、ドーナツ状のプラズマ（トラスプラズマ）の閉じ込めに適した磁場配位（MHD 平衡）をつくる「ヘリカル系方式」と、外部コイル系だけでなくトラスプラズマ中に大きな電流を流すことで、磁場配位をつくる「トカマク方式」とが、有望な磁場閉じ込め方式として挙げられます。一般に、プラズマ中に大きな電流を流すトカマク方式では、回転対称性のある軸対称な磁場配位でプラズマを閉じ込めることができますが、主に外部コイル系に流す電流だけで閉じ込めに適した磁場配位を作るヘリカル系方式では、プラズマ電流を駆動（通常は電磁誘導を用いる）する必要が無く定常運転に適しているなど多くの利点があるのですが、磁場配位を軸対称とすることができないので、その実験・理論解析には対称性を利用することができず、三次元解析が必要となります。このような非軸対称ヘリカル系プラズマの例として、京都大学エネルギー理工学研究所のヘリオトロン J 装置で閉じ込められるプラズマの形状を図 1 に示します。本研究分野での主な研究テーマの一つが、このような非軸対称トラスプラズマであるヘリカル系プラズマの実験・理論解析です。ここではその中から三次元 MHD 平衡とプラズマ電流分布の時間発展に関する研究を紹介します。

ヘリカル系プラズマの研究において、最も重要なものの一つに MHD 平衡解析があります。先に述べたとおり、ヘリカル系方式では主に外部コイル系に流す電流で閉じ込めに適した磁場配位を作りますが、プラズマ自身が荷電粒子の集合体ですので、これらの運動は電流や磁場を作ります。したがって、高い圧力のプラズマが存在するときの磁場配位は、外部コイル系が作る磁場だけでなく、プラズマ自身が作る磁場も自己無撞着に考慮する必要があります、これを MHD 平衡解析と言います。また、ヘリカル系プラズマではプラズマ電流を積極的に流す必要はないのですが、現実には自発電流などいろいろな要因でプラズマ電流が流れています。しかし高温プラズマは電気伝導度が大きいことと磁束の変化による誘導起電力のため、プラズマ電流分布の時間発展の時定数は長く、容易に定常状態になりません。プラズマ電流分布は磁場配位を変化させるので、ここで示したような電流分布の過渡応答解析は、プラズマの磁場閉じ込めを研究する上で非常に重要となります。私たちの分野ではこれらの解析ツールを開発し、ヘリカル系プラズマの実験解析に適用し、実験における電流分布の過渡応答の重要性を示しました。

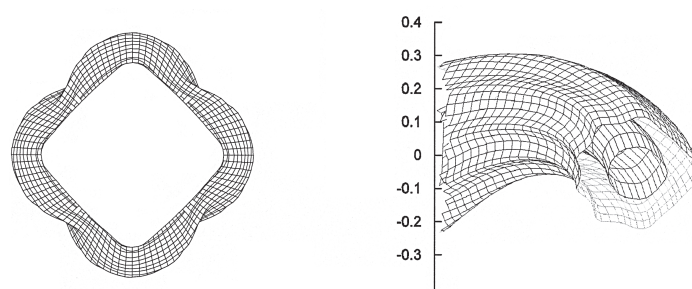


図 1 ヘリオトロン J プラズマの上面図と断面図（磁気面）

## 応用熱科学講座 応用基礎学分野（野澤研究室）

<http://www.energy.kyoto-u.ac.jp/>

### 「ビット直列・ワード並列方式機能メモリを用いた新しい検索・整列アルゴリズム」

並列演算処理による電子計算機高性能化の一環としてビット直列・ワード並列方式機能メモリを用いた新しい検索（サーチ）・整列（ソート）アルゴリズムなどが実現可能な新しい情報処理システムの完成を目指した研究を行っています。従来の計算機では逐次型演算処理をおこないます。キーワード検索の場合、いわゆる順検索を用いて  $n$  個の被検索サンプル全てを走査するため、 $n$  回ワード単位での一致・不一致判定を必要とします。一方整列の場合にはバブルソートおよびクイックソートやマージドソートなどがあります。これらの演算処理性能を 2 ワードずつ大小比較の演算回数で表すとよく知られているようにバブルソートの場合は  $O(n^2)$  回でクイックソートやマージドソートのよう改良されたアルゴリズムでも  $n \log n$  のオーダーになります。現在のところこれが理論的限界といわれています。

ビット直列・ワード並列方式機能メモリを利用して検索・整列を行う場合、並列処理演算が可能になるため、処理速度が向上することは容易に予測できます。ここでは演算回数がどうなるか考察します。検索の場合、ビット列毎に全ワード一括して一致・不一致を判定することができるため、サンプル数を単純に  $n=2^m$  個と置いて考察すると  $m=\log n$  回となり劇的に減少することができます。整列（ソート）の場合も若干複雑度が増えますが検索同様にビット列毎に演算を行う動作を利用します。同様にサンプル数を単純化のため  $n=2^m$  個と置いて大小比較を行い数の小さいものをワード行でいうと下方に並び替える操作について考察します。まずどこかに、できれば機能メモリ内で確保できれば一番いいのですが、とりあえず主メモリ内に被整列データ容量と同じ大きさのデータ領域を確保しておきます。次に処理するデータを機能メモリ内に移動します。この場合通常 move の機能を使いますが、この機能がないシステムでは read により主メモリから CPU に一旦データを取り込んだ後 write 命令により機能メモリに書き込む動作を連続して実行することと等価になります。その後最上位のビット列から比較を行います。ビット単位で大小比較するので 2 進数 “0”, “1” のどちらであるかを判定します。従って参照データとして “1” を用いて最初の列は全ワードのデータにつき局所比較器を用いて一致・不一致を判定し、一致するもの、不一致のものを主メモリ内の上下 2 領域に振り分けます。そして次の位のビットを処理します。以降、全ワードを一括移動しワード線分割方式を採用することも可能ですが、とりあえず簡明を期し、最上位の位が “1” のものと “0” のものに 2 分割して主メモリから機能メモリに移動し同様に “1”、“0” 判定を行い、その結果に基づき主メモリに振り分けて格納します。3 番目の位、ビット列では 4 分割したデータについて同様に “1”、“0” 判定しデータを振り分ける。この操作を全部の位、ビット列について繰り返し実行することにより、主メモリの一番上のワードに一番大きな数のデータが来て、一番下の位置にあるワードに一番小さな数のデータが来ますので大小の順番で並び替えが完了します。このソートアルゴリズムでの大小比較の演算回数は  $1+2+2^2+\cdots+2^{(m-1)}=2^m-1$  となります。従って、現在の理論的限界を超えて  $O(n)$  回にまで減少することができます。

検索・整列のアルゴリズムを比べると共通性が多く同じ回路を使った処理が可能と考えられます。さらに、機能メモリでの操作を並列に行い処理速度を高めることも考えられます。また、インターネットの普及により、ブラウザからキーワード検索をする機会も増えています。ヒットする項目数はキーワードの普遍性、特殊性にもよりますが数万、多いときには百万を超える時もあります。この数は今後も増加の一途をたどるものと考えられています。検索といっても同時に整列も行っているので、機能メモリを使ったこの種の情報処理を効率良く行うための研究を鋭意進める必要があります。

## エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野（長崎研究室）

[http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index\\_j.html](http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index_j.html)

### 「相対論的電子ビームを用いた新量子放射エネルギーの発生」

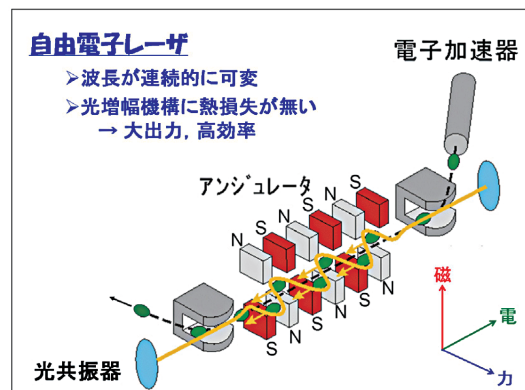
本研究室では、荷電粒子と電磁界との相互作用の高度・高精緻制御による先進科学技術の開発を目指して、電磁波によって生成・加熱された核融合プラズマの閉じ込め性能の改善と理解、プラズマ加熱・電流駆動システムの開発、危険物検査から医療まで多様な応用が期待される超小型核融合中性子・陽子源や、ここで紹介する高輝度・高エネルギー電子ビームの生成とそれを用いた新量子放射エネルギーの発生などの研究を行っています。

高エネルギー電子ビームを用いることによって、従来のレーザ等にはない機能、波長領域、強度の新しい放射源が実現します。例えば、SPRING-8に代表されるシンクロトロン放射は既に盛んに利用されています。

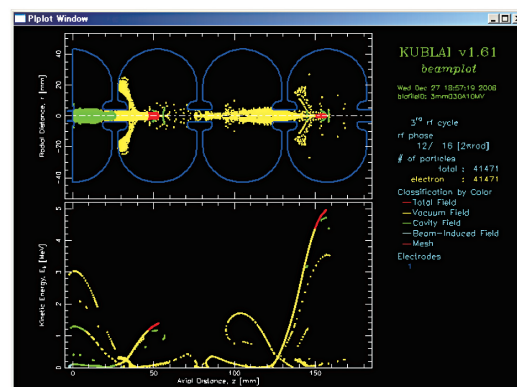
レーザ逆コンプトン散乱による準単色ガンマ線源や、広い波長領域でのコヒーレント光の発生が可能な自由電子レーザ（Free Electron Laser: FEL）も世界中で研究開発が行われています。従来のレーザは原子や分子に束縛された電子が高エネルギー準位から低い準位に遷移するときには発生しますが、FELは言わば準位を人工的に作り出すことによって得られ、様々な新たな要求に応える柔軟性を具えています。

右上図のように、FELは電子加速器、アンジュレータ、光共振器から成ります。高エネルギー電子は、アンジュレータの周期的交代静磁場の中を蛇行し、その周期（数cm）に応じた波長の電磁波を放出しますが、このとき相対論的ドップラーシフトの効果により、前方に放出される電磁波（自発放射光）の波長は電子エネルギーに応じてTHzから可視、X線領域にも達します。さらに、蛇行する電子は横方向の速度成分を持ちますので、自発放射光の横方向電界と相互作用してエネルギーの授受が起り、条件が整えば光の増幅が起こります。また、光の磁界とそれに直角な横方向の速度成分によって電子には進行方向にも力が働き、電子は光のある位相に集群化されます。その位相が光の増幅条件下にあれば光はコヒーレントなレーザになります。

FELは相対論的電子の運動エネルギーを、より付加価値の高い量子放射エネルギーに無損失で変換したものとさえ、右上図中に示したような従来のレーザにない特長があります。私たちが宇治キャンパスで開発しているFELでは、平成20年3月に約40 MeVの電子ビームを用いて波長12.4  $\mu\text{m}$ の中赤外FEL発振に成功しました。現在は、波長4～20  $\mu\text{m}$ 連続可変FEL発振を目指した研究開発とFELの利用研究を進めています。さらに、コヒーレントTHz光や準単色ガンマ線の発生も将来計画しています。これらの先進量子放射源の性能の鍵を握っている高輝度電子ビーム生成の数値シミュレーション研究においても、本研究室は世界をリードする研究成果を挙げています。国内シミュレーションコードのベンチマークを高輝度光科学研究センター/SPRING-8と共催していますので、そのホームページ<http://acc-web.spring8.or.jp/~workshop/e-gun/>も参照してください。



自由電子レーザ（FEL）の概念図と特



本研究で開発した有限要素法粒子シミュレーションコード



## エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野（水内研究室）

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/plasmak/>

## 「高繰り返し YAG トムソン散乱計測による磁場閉じ込め核融合プラズマの高性能化」

磁場閉じ込め核融合装置によって核融合炉を実現するためにはプラズマの閉じ込め性能を向上させることが重要な課題である。近年、通常のプラズマの閉じ込め性能を向上させる様々な閉じ込め特性改善モードが発見されてきた。さらに優れたプラズマ閉じ込めを実現する閉じこめ改善モードはプラズマ内部の構造に密接に結びついていることがわかってきた。

図1はヘリカル型磁場閉じ込め核融合装置 CHS において観測された内部輸送障壁による閉じこめ改善のプラズマ分布である。図1(a)(b)は、それぞれプラズマの電子温度と電子密度の分布を示している。この実験は、プラズマの密度を低く保持しながらプラズマ中心部のみを電子サイクロトロン波によって加熱することによって行った。このとき図1(a)に特徴的に示されているようにプラズマの電子温度が中心部でのみ上昇し通常の約0.7keVの温度から約3.6keV（約4000万度）まで上昇している。対照的にプラズマの外側領域では温度上昇がみられていない。これは、ちょうど分布が屈曲しているところにあたる境界領域でプラズマ中の乱流が抑制され閉じ込め性能が向上したため、このようなプラズマ分布が形成されたのである。原因はプラズマの電場にあると考えられている。図1(c)は、このときのポテンシャル分布の計測結果であるが温度の屈曲点あたりで大きく変化し、この領域で大きな電場が形成されていることがわかる。このように閉じこめ改善モードを探究するにはプラズマの分布を高精度で計測することが必要である。加えて閉じこめ改善モードは放電の途中でプラズマパラメータの変化とともに遷移的に変化する現象や、早い時間周期で急速に変化するものなどがありプラズマ分布のみならず、その時間発展を計測できなければ物理特性を解明することが困難である。

そこで新しく高繰り返し発振が可能な Nd:YAG レーザーを用いたトムソン散乱計測装置の開発を行いプラズマ分布の時間発展を計測することを計画している（図2）。Heliotron J 装置の放電時間は約200msであるため550mJ、50HzのNd:YAGレーザーを二台使用し、レーザービームを合成することによって100Hz（10ms）の時間間隔でプラズマ分布の時間発展を計測することをめざしている。またHeliotron J 装置は上下に架台が存在するため水平方向にのみトムソン散乱計測が設置に必要な十分なスペースが存在する。そこで図2で示したようにプラズマの斜め下方からレーザーを入射しプラズマからの後方トムソン散乱光を水平方向から検出する配置をとることにした。散乱光の検出効率をあげるため大型の凹面鏡（直径80cm）によって集光し、25台のポリクロメーター（分光器）で散乱光のドップラー広がり解析することによって空間25点、約1cmの空間分解能でプラズマ分布と、その時間発展を計測することができる。このNd:YAGレーザートムソン散乱装置を用いて閉じこめ改善モードの物理機構を解明しHeliotron J 装置の高性能化を実現するのを研究目標としている。

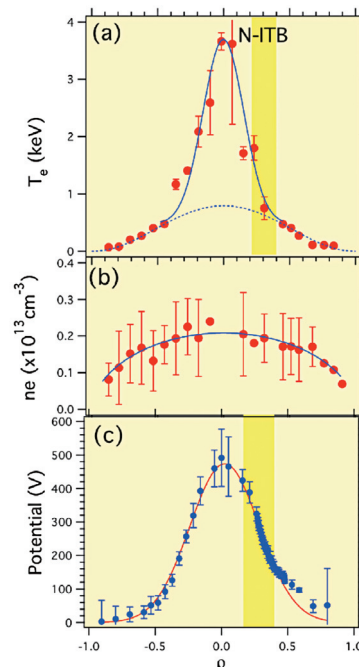


図1

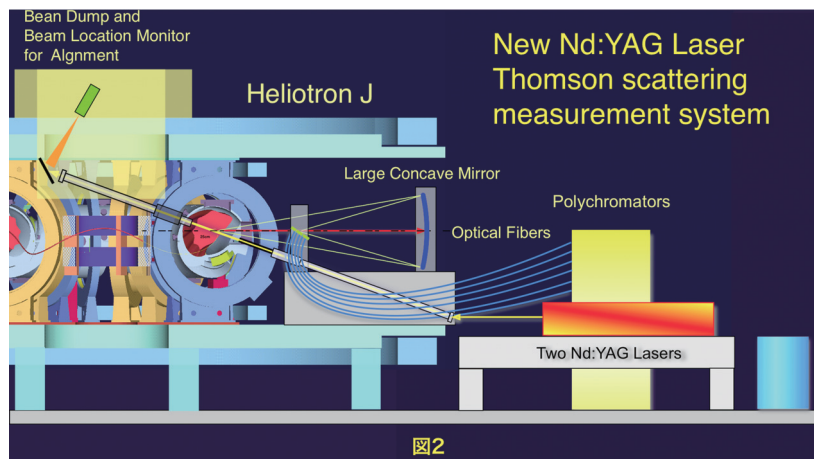


図2



# 生存圏診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野（山本研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/yamamoto-lab>

## 「人工降雨・降雪のためのミリ波レーダー雲観測技術に関する研究」

当研究室は、先端的大気レーダー・リモートセンシング技術を開発し、大気圏の未知・未解決の諸現象の解明に挑んでいる。ここでは、その一例としてミリ波レーダーを用いた人工降雨・降雪に適した雲の観測技術の研究について紹介する。雲粒は粒径が雨粒に比べてはるかに小さいため、気象観測で一般的に用いられるCバンド（～5GHz）やXバンド（～10GHz）等の気象レーダーでは観測できない。当研究室ではメーカーと協同で波長の短いKaバンド（～35GHz）の車載型ミリ波レーダーを開発した。

将来の水資源不足は深刻で、2025年までに世界の人口の約2/3が水不足に直面すると言われている。日本においても、国民1人当りの降水量は世界平均の1/4と少なく、しかも急峻な地形により降水は短時間で海洋に流失するため、水資源としての利用率も低い。多くの人口密集地域は潜在的な水不足の状態にあり、雨不足・雪不足が続くと容易に渇水となる。渇水は10年に2～3回と頻発しており、およそ10年に1回の割合で深刻な渇水が発生している。地球温暖化が進むと少雨・渇水や豪雨・洪水などの現象が起こり易くなることも指摘されており、今後益々水不足が深刻になると予想される。安定的水資源確保を目的とした人工降雪技術や、渇水対策に即効性のある人工降雨技術について研究し、今後予想される水不足問題・干ばつ等の災害軽減対策を講じる必要がある。当研究室では、気象研究所などと協力して、「渇水対策のための人工降雨・降雪に関する総合的研究」（平成18～22年度科学技術振興調整費；気象研究所 村上正隆代表）を推進している。本研究では、山岳性降雪雲の人工調節手法の高度化を図り、水資源確保のための人工降雪技術の確立を目指している。また、渇水の度に強く望まれる人工降雨について、その可能性を明らかにするための基礎的研究を行う。特に、当研究室では、ミリ波レーダー観測により、人工降雨・降雪に適した雲を判別するための技術開発を担当している。

平成19年度の冬季を対象とした航空機を用いたシーディング実験時に、12月2日～20日に車載型ミリ波レーダーを群馬県みなかみ町宝台樹（標高1050m）に設置し、観測を行った（図1）。レーダーは中心周波数34.75GHz、ピーク送信電力100kWであり、直径2mのカセグレンアンテナを全天走査可能である。図2にシーディング実験の行われた12月17日に方位角305°方向でRHI観測されたエコー強度鉛直断面の時間変化を示す。シーディングは16時07分03秒～16時10分26秒に海拔3.3kmで行われ、その高度での風向・風速は297°・18m/sであった。シーディングはほぼ風向に直交する方向に直線状に行われた。16時16分にシーディングに伴うと思われるエコーが距離23km、高度2km辺りに現れ（レーダーの海拔高度が1kmであることに注意）、それが背景風に流されるようにレーダーに近付きながら発達・衰弱する様子が、レーダー直上に達する16時38分まで捉えられた（図は16時31分までのみ示す）。今後、シーディングにより発達・降雪に至る雲の判別方法を明らかにしていく。



図1. 群馬県みなかみ町宝台樹における車載型ミリ波レーダーによる観測の様子

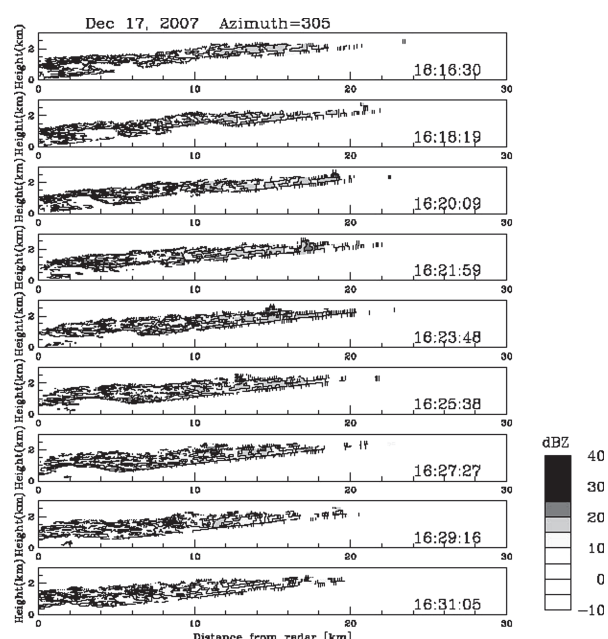


図2. 2007年12月17日16時16分～31分の方位角305°方向におけるエコー強度の鉛直断面

## 生存圏開発創成研究系 宇宙圏航行システム工学分野（山川研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space>

## 「燃焼性ガスセンサ利用のための二酸化マンガンの電気特性解析」

二酸化マンガンは  $\text{MnO}_2$  の化学組成をもち、電池材料として一般にもよく知られた物質です。ところが、二酸化マンガンの結晶構造には  $\alpha$  型、 $\beta$  型、 $\varepsilon$  型、 $\gamma$  型、 $\lambda$  型、 $\delta$  型、R 型と 7 種類の異なる結晶構造が存在し（図 1）、それぞれの結晶構造毎に、導電性やイオン交換性など多くの物理・化学的性質が全く異なるという事実は、無機材料の専門家の間でもあまり知られていません。近年、SPRING-8 に代表される放射光施設や中性子利用施設の高性能化が進み、従来、十分な解析が困難であった二酸化マンガンにおいても局所的な結晶構造の違いを解析することが可能になってきました。その結果、アール（R）型結晶構造を有する二酸化マンガンのナノ粒子（RMO）は、酸化物であるにもかかわらず室温下においてプロトン伝導性を示し、電気的特性が他の結晶構造と比較して異なる事が明らかにされつつあります。本研究では、RMO に特有の電気特性を利用することで、水素ガス等の燃焼性ガスに対する反応の基礎特性を計測します。また、常温型水素センサや燃料電池への応用を見据え、将来的にはロケット打ち上げ時の水素燃料の監視や、小型燃料電池の実現など、宇宙圏での使用も考慮に入れた研究を進めています。燃焼性ガスに対する反応を示す物質は、高分子化合物や金属酸化物など様々な物がありますが、室温で十分なプロトン伝導性を持つ金属酸化物としては、R 型二酸化マンガンが初めてであり、その化学的性質を解析することは将来の科学技術の発展に貢献出来る物だと期待されています。

これまでの研究の結果、RMO に対するプロトン伝導性に関する特性の一つとして、水素ガスに対する反応特性が判明しました。基礎特性解析として、RMO のナノ結晶粉末を直径 2cm のペレット上に圧縮加工し、白金メッシュで挟み込む事で（図 2）、常温（約 25℃）下における水素ガスの濃度依存性について計測しました。それにより、濃度反応域が 1% ～ 99.9% と広範囲の濃度領域に対して電圧反応特性が得られる事が判明し（図 2）、その特性傾向を基にした水素ガスセンサを現在開発中です。また、RMO は結晶構造的に 100℃ 以上の中温域下においてプロトン伝導特性が向上する事がわかっていますので燃料電池的な性能も併せ持つため、これまであまり使用されていない温度域（100℃ から 300℃ 程度）での新しい酸化物型燃料電池材料としても期待されつつあります。また、今後はメタンやジメチルエーテル等の他の燃焼性ガスに関しての調査・研究も進めて行く予定です。

## 参考文献

- [1] Yoshikatsu Ueda, M. Tsujimoto, K. Takeuchi, H. Koyanaka, and M. Takano, Hydrogen gas sensor using nano-sized R-MnO<sub>2</sub> powder, ECS Trans. vol. 16, no. 11, pp.287-pp.292 (2008)

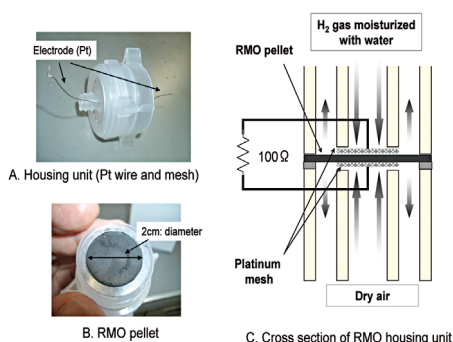


図 2. 水素ガス反応治具と実験概略図

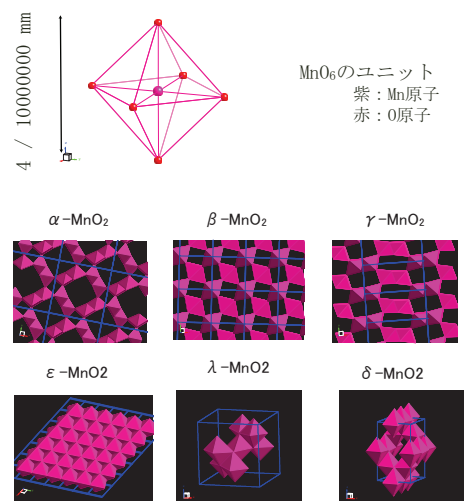
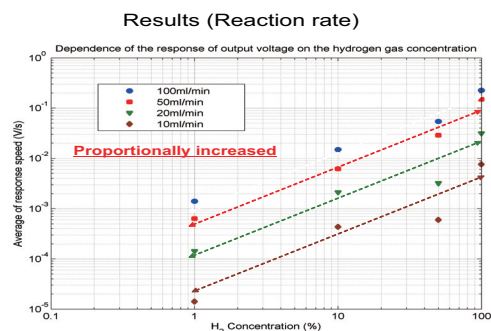
図 1.  $\text{MnO}_2$  の組成と、代表的な結晶構造

図 3. 水素ガス特性結果の例



## 生存圏開発創成研究系 生存圏電波応用分野（橋本研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/hashimoto.html>

## 「GaN ショットキーダイオードを用いた建物内マイクロ波配電システム用レクテナの開発」

当研究室では、電波をエネルギー伝送媒体として利用し、エネルギー・環境問題の一つの解である太陽発電所 SPS の研究をはじめ、マイクロ波無線電力伝送を応用した新しい生存基盤に関する研究開発を行なっている。橋本研では 2006 年度より鹿島建設、徳島大学、岡山大学のグループで建物内の床下の空間を利用したマイクロ波配電システムの研究を行っている。既存建物構造（デッキプレート）を利用してマイクロ波電力を伝送することで、電気配線工事の省略による初期投資の削減メリットと電気配線改修工事費の削減メリットが得られる新しい電気配線設備として提唱し、JST より 2006-2008 年度に資金を得て研究を行った。建物内マイクロ波配電システムは「コードレス建物」ともいえる。

建物内マイクロ波配電システムでは床下のデッキプレート閉空間送電網内を伝搬するマイクロ波を、レクテナ（Rectenna = Rectifying Antenna）でピックアップと整流して電気に変換し、安定化のための蓄電池を通して直流コンセントとして利用する。マイクロ波は現在 2.45GHz を用いている。レクテナでマイクロ波を電気に変換するにはショットキーバリアダイオードで直流に変換することが最も効率が良い。本提案システムではレクテナを「コンセント」として利用するために通常の Si や GaAs のショットキーバリアダイオードを用いては電力が不足する。そこで徳島大との共同研究で開発した世界に例のないワイドバンドギャップ半導体である GaN ショットキーバリアダイオードを用いたレクテナを開発した（図左下）。これまでは Si ショットキーバリアダイオードを用いて電力分配器と組み合わせ、多数のダイオードを用いてかつダイオードへの入力電圧を小さくすることで大電力高効率化を図るレクテナを開発してきたが（図右下）、256 素子ダイオードで 100W 整流であり、これに対し、GaN ショットキーバリアダイオードを用いたことでレクテナを大電力化（1 素子 5W=Si の約 10 倍）し、小型化・高効率化に成功した（図右上）。

マイクロ波配電システムで用いたレクテナ他の各要素は SPS につなげることが出来、橋本研では今後もマイクロ波送電の地上応用とともに SPS という宇宙応用を推進する。

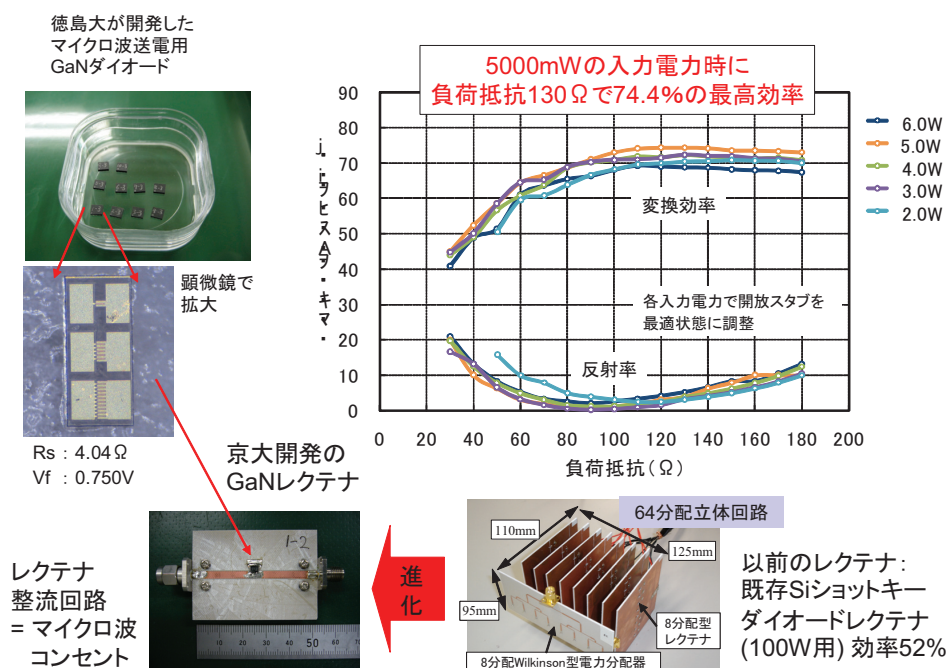


図 GaN ショットキーバリアダイオードを用いた建物内マイクロ波配電システム用レクテナ